

Προσδιορισμός συνάρτησης απεικόνισης για τον υπολογισμό της τροποσφαιρικής υστέρησης στα σήματα GPS με χρήση δεδομένων ραδιοβόλισης. Εφαρμογή στον Ελλαδικό χώρο

Σ. ΚΑΤΣΟΥΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ

Υποψήφιος Διδάκτωρ ΑΠΘ

Χ. ΠΙΚΡΙΑΔΑΣ

Επίκουρος Καθηγητής ΑΠΘ

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός συνάρτησης απεικόνισης με σκοπό τον υπολογισμό της τροποσφαιρικής επίδρασης στα σήματα GPS για τον Ελλαδικό χώρο. Η μέθοδος προσδιορισμού στηρίζεται σε πραγματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από μετρήσεις ραδιοβόλισης σε σταθμούς εντός και περιμετρικά του Ελλαδικού χώρου. Η χρήση των συναρτήσεων απεικόνισης αποτελεί σημαντικό παράγοντα για μετρήσεις GPS ακριβείας, ιδιαίτερα σε χαμηλές γωνίες ύψους των δορυφόρων, όπου προκύπτει η ανάγκη του προσδιορισμού της υστέρησης σε σχέση με τη γωνία ύψους. Η εξάρτηση της τροποσφαιρικής υστέρησης από τη γωνία ύψους οφείλεται στο γεγονός ότι το σήμα πρέπει να ταξιδέψει μέσα από πολύ μεγαλύτερο τμήμα της ατμόσφαιρας μέχρι να φτάσει στον δέκτη. Η συνάρτηση υπολογίστηκε από μετεωρολογικά δεδομένα διάρκειας δύο ετών και αξιολογήθηκε η ακρίβειά της με συγκρίσεις που έγιναν τόσο με τις μετρήσεις της ραδιοβόλισης, όσο και με τις αντίστοιχες τιμές που δίνονται από συναρτήσεις απεικόνισης που προτείνονται από τη διεθνή βιβλιογραφία.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός μίας συνάρτησης απεικόνισης με σκοπό τον υπολογισμό της τροποσφαιρικής επίδρασης στα σήματα GPS για την περιοχή του Ελλαδικού χώρου που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε εφαρμογές απόλυτου, όσο και σε σχετικού προσδιορισμού θέσης.

Τροπόσφαιρα στις μελέτες διάδοσης των ραδιοκυμάτων καλείται το κατώτερο στρώμα της γήινης ατμόσφαιρας που εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το υψόμετρο των 80 περίπου χιλιομέτρων από αυτήν [18].

Η επίδρασή της εξαρτάται από τις λεγόμενες ατμοσφαιρικές παραμέτρους που είναι η θερμοκρασία, η πίεση και η υγρασία. Η τροποσφαιρική επίδραση ενός σήματος υπολογίζεται από τα διάφορα προτεινόμενα μοντέλα, αρχικά, ως ίση

με αυτή που προέρχεται από πομπούς εκπομπής που βρίσκονται στο ζενίθ του σημείου παρατήρησης και στη συνέχεια ανάγεται στην αντίστοιχη ζενιθία γωνία. Σε αυτή την περίπτωση ο υπολογισμός της τροποσφαιρικής υστέρησης γίνεται με τη βοήθεια της κατάλληλης συνάρτησης απεικόνισης.

Στη βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες σχέσεις υπολογισμού της επίδρασης, συναρτήσει της γωνίας ύψους των δορυφόρων σε παγκόσμια κλίμακα, χρησιμοποιώντας κατάλληλες σχέσεις για τον υπολογισμό των ατμοσφαιρικών χαρακτηριστικών, ενώ άλλες συναρτήσεις απαιτούν την ύπαρξη μετεωρολογικών δεδομένων εδάφους στο σημείο παρατήρησης.

Η μέθοδος προσδιορισμού της νέας συνάρτησης βασίζεται σε δεδομένα ραδιοβόλισης εντός της Ελληνικής επικράτειας, αλλά και περιμετρικά αυτής. Κατά τη διαδικασία της ραδιοβόλισης, μια συσκευή εφοδιασμένη με βαρόμετρο, θερμομετρο και υγρόμετρο ανεβαίνει σε συνεχώς μεγαλύτερα ύψη από την επιφάνεια του εδάφους με τη βοήθεια ενός μετεωρολογικού μπαλονιού, στέλνοντας τις μετρήσεις στο σταθμό του εδάφους. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν καλύπτουν διάρκεια δύο ετών.

Η δημιουργία μίας τοπικού χαρακτήρα συνάρτησης απεικόνισης έδειξε ότι μπορεί να προσεγγίσει καλύτερα την υστέρηση που προκύπτει από τα πραγματικά δεδομένα, ακόμη και σε μικρές γωνίες ύψους των αντίστοιχων δορυφόρων εκπομπής, αυξάνοντας τα διαθέσιμα δεδομένα και βελτιώνοντας κατά συνέπεια την ακρίβεια προσδιορισμού θέσης.

2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

ΔL_h^z : Κατακόρυφη υδροστατική υστέρηση.

ΔL_w^z : Κατακόρυφη υγρή υστέρηση.

- $m_h(u)$: Συνάρτηση απεικόνισης για την υδροστατική υστέρηση
 $m_w(u)$: Συνάρτηση απεικόνισης για την υγρή υστέρηση.
 ΔL : Κεκλιμένη τροποσφαιρική υστέρηση.
 ΔL^z : Κατακόρυφη τροποσφαιρική υστέρηση.
 P_0 : Επιφανειακή ολική ατμοσφαιρική πίεση.
 e_0 : Επιφανειακή πίεση των υδρατμών.
 T_0 : Θερμοκρασία επιφανείας σε βαθμούς Kelvin.
 N : Διαθλαστικότητα.
 n : Δείκτης διάθλασης.

3. ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

3.1 Τροποσφαιρική επίδραση

Το στρώμα της τροπόσφαιρας, που είναι μεταβλητού πάχους, περιλαμβάνει αέρια συστατικά κυρίως οξυγόνο $\approx 20\%$ και άζωτο $\approx 78\%$, καθώς επίσης και υδρατμούς. Η τροπόσφαιρα για τα ραδιοκύματα μέχρι και 15 GHz (1.5 GHz το σήμα GPS) δεν αποτελεί μέσο διασποράς, δηλαδή η μεταβολή του δείκτη διάθλασης δεν είναι συνάρτηση της συχνότητας του σήματος, όπως αντίθετα συμβαίνει με την ιονόσφαιρα.

Η τροποσφαιρική καθυστέρηση εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους που είναι η θερμοκρασία, η πίεση και η υγρασία ή όπως λέγεται από τον ξηρό παράγοντα- συνιστώσα (επίδραση της τάξης του 90% και εύκολα μοντελοποιήσιμο) και από τον υγρό παράγοντα-συνιστώσα (επίδραση της τάξης του 10% και δύσκολα μοντελοποιήσιμο). Είναι, επίσης, συνάρτηση της ζενίθιας γωνίας του αντίστοιχου δορυφόρου εκπομπής και επομένως της απόστασης που διανύει το σήμα στην τροπόσφαιρα, και του ορθομετρικού υψομέτρου του δέκτη (ελαττώνεται με την αύξηση του υψομέτρου) [6],[22],[24].

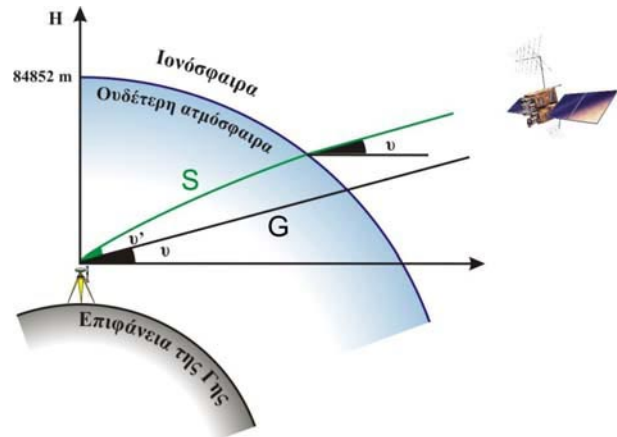
Η πορεία που ακολουθεί ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα που εκπέμπεται από δορυφόρους πλοήγησης, όπως αυτοί του συστήματος GPS, κατά τη διέλευσή του μέσα από την τροπόσφαιρα, υφίσταται διάθλαση με αποτέλεσμα την εκτροπή από την ευθύγραμμη πορεία του και την καθυστέρησή του η οποία υπολογίζεται ως:

$$\Delta L = \int_s n ds - G \quad (3.1)$$

ή προσθαφαιρώντας το μήκος της καμπύλης διαδρομής S

$$\Delta L = \int_s [n - 1] ds + [S - G] \quad (3.2)$$

όπου n ο δείκτης διάθλασης κατά μήκος της πραγματικής τροχιάς S του ραδιοκύματος, G η ευθεία διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 1. Διάδοση ραδιοκύματος στην Τροπόσφαιρα.
 Figure 1. Tropospheric radiowave propagation

Για τον λόγο ότι ο δείκτης διάθλασης διαφέρει πολύ λίγο από τη μονάδα χρησιμοποιείται αντί αυτού η διαθλαστικότητα N , όπου $m = 10^6 (n - 1)$. Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, τη διαθλαστικότητα αντί του δείκτη διάθλασης η σχέση 3.2 γράφεται ως:

$$\Delta L = 10^{-6} \int_s N ds + [S - G] \quad (3.3)$$

Για τη διαθλαστικότητα της ατμόσφαιρας κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες σχέσεις όπως [21]:

$$N = k_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + k_2 \left(\frac{e}{T} \right) Z_w^{-1} + k_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) Z_w^{-1} \quad (3.4)$$

Όπου k_1 , k_2 και k_3 σταθερές παράμετροι και Z_d^{-1} , Z_w^{-1} είναι οι αντίστροφες παράμετροι συμπιεστότητας για τον ξηρό και υγρό παράγοντα, αντίστοιχα και P_d η μερική πίεση του ξηρού αέρα.

Μία πιο εύχρηστη μορφή για τη διαθλαστικότητα αναπτύχθηκε από ομάδα ερευνητών [5], όπου με βάση τη σχέση 3.4, συμπεριλαμβάνεται και η πυκνότητα ρ των αερίων

$$N = k_1 R_d \rho + k_2' \left(\frac{e}{T} \right) Z_w^{-1} + k_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) Z_w^{-1} \quad (3.5)$$

ή συνοπτικά $N = N_h + N_w$

$$\text{με } N_h = k_1 R_d \rho \quad (3.6)$$

$$\text{και } N_w = k_2' \left(\frac{e}{T} \right) Z_w^{-1} + k_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) Z_w^{-1} \quad (3.7)$$

Όπου,

e = μερική πίεση των υδρατμών (σε mbar) και $k_2' = (17 \pm 10) \text{ K/mbar}$, R_d = ειδική σταθερά για τα αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας.

Με βάση, λοιπόν, τη σχέση 3.5 για τη διαθλαστικότητα της ατμόσφαιρας, το ολοκλήρωμα για την τροποσφαιρική

υστέρηση κατά τη διαδρομή ενός κύματος μέσα από αυτήν καταλήγει στη μορφή:

$$\Delta L = 10^{-6} \int_s N_h ds + 10^{-6} \int_s N_w ds + [S - G] \quad (3.8)$$

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το πρώτο ολοκλήρωμα της σχέσης 3.8 αφορά στην εξάρτηση της υστέρησης από την ολική πυκνότητα και όχι από το λόγο «υγρή/ξηρή» ατμόσφαιρας και καλείται υδροστατική υστέρηση και το δεύτερο ολοκλήρωμα εξαρτάται μόνο από την ποσότητα των υδρατμών κατά την πορεία του σήματος και καλείται υγρή υστέρηση.

Τέλος ο παράγοντας [S-G] εκφράζει το γεωμετρικό σφάλμα το οποίο είναι η διαφορά μεταξύ του γεωμετρικού μήκους της καμπύλης διαδρομής S και της ευθείας G. Ενσωματώνοντας το γεωμετρικό σφάλμα στην υδροστατική υστέρηση, η σχέση 3.8, συνοπτικά, γράφεται ως:

$$\Delta L = \Delta L_h + \Delta L_w \quad (3.9)$$

3.2 Μοντέλα και συναρτήσεις απεικόνισης υπολογισμού της τροποσφαιρικής υστέρησης

Η τροποσφαιρική επίδραση ενός σήματος υπολογίζεται από τα διάφορα (προτεινόμενα) μοντέλα αρχικά ως ίση με αυτή που προέρχεται από πομπούς εκπομπής που βρίσκονται στο ζενίθ του σημείου παρατήρησης και στη συνέχεια ανάγεται στην αντίστοιχη ζενίθια γωνία. Για διευθύνσεις όχι πολύ διαφορετικές από το ζενίθ η υστέρηση, συνήθως, υπολογίζεται ως το γινόμενο της ζενίθιας υστέρησης με το αντίστροφο του ημίτονου της γωνίας ύψους του δορυφόρου, δηλαδή,

$$\Delta L = \frac{1}{\sin(\nu)} \Delta L^z \quad (3.10)$$

Η σχέση αυτή, συνήθως, καταλήγει σε αυξανόμενο σφάλμα όσο μειώνεται η γωνία ύψους του δορυφόρου. Αυτό το φαινόμενο αποτελεί και έναν από τους κύριους λόγους για το ότι οι μετρήσεις GPS πραγματοποιούνται με γωνία αποκοπής των δορυφορικών σημάτων ίση με 15°.

Ένα από τα συνήθη μοντέλα υπολογισμού της τροποσφαιρικής υστέρησης, που χρησιμοποιείται από αρκετά λογισμικά κατά την επεξεργασία των μετρήσεων GPS, είναι το μοντέλο Saastamoinen [20]. Το μοντέλο αυτό υπολογίζει την ολική υστέρηση σε σχέση με τη ζενίθια απόσταση z με βάση τη σχέση:

$$\Delta L = \frac{2.277 \cdot 10^{-3}}{\cos z} (P_0 + (\frac{1255}{T_0} + 0.05) \cdot e_0 - 1.16 \cdot \tan^2 z) \quad (3.11)$$

όπου,

P_0 = η ολική ατμοσφαιρική πίεση (σε mbar).

e_0 = η μερική πίεση των υδρατμών (σε mbar).

T_0 = η θερμοκρασία (σε βαθμούς Kelvin).

Μία από τις πιο γνωστές και ακριβείς στον υπολογισμό τους συναρτήσεις απεικόνισης είναι αυτή που προτάθηκε από τον ερευνητή Marini [13].

Η συνάρτηση αυτή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στο μοντέλο Saastamoinen (όρος $\frac{1}{\cos(z)}$) έχει ως σκοπό τον υπολογισμό της τροποσφαιρικής υστέρησης σε διάφορες γωνίες ύψους και περιγράφεται αναλυτικά από τη σχέση:

$$m(\nu) = \frac{1}{\sin(\nu) + \frac{a_1}{\sin(\nu) + \frac{a_2}{\sin(\nu) + \frac{a_3}{\sin(\nu) + \dots}}} \quad (3.12)$$

όπου οι όροι a_1, a_2, a_3 υπολογίζονται με παρεμβολή από αντίστοιχους πίνακες, έχοντας ως δεδομένα εισόδου τα μετεωρολογικά στοιχεία του σημείου παρατήρησης.

Σύμφωνα, λοιπόν, με τα όσα αναφέρθηκαν, η γενική σχέση που εκφράζει τη συνολική υστέρηση ενός ραδιοκύματος κατά τη διέλευσή του μέσα από την τροπόσφαιρα, συναρτήσει της κατακόρυφης υστέρησης αλλά και αυτής που προκύπτει για την ανάλογη γωνία ύψους του δορυφόρου εκπομπής, γράφεται συνοπτικά ως [1],[2],[19]:

$$\Delta L = \Delta L_h^z \cdot m_h(\nu) + \Delta L_w^z \cdot m_w(\nu) \quad (3.13)$$

Με την πάροδο των χρόνων προτάθηκαν από πολλούς ερευνητές διάφορες σχέσεις, διαχωρίζοντας τον υγρό από τον ξηρό παράγοντα και επιτυγχάνοντας τον υπολογισμό της υστέρησης για γωνίες ύψους των δορυφόρων μέχρι και 2° [3],[4],[5].

Αξίζει να αναφερθεί η συνάρτηση που προτάθηκε από τον καθηγητή κ. Υφαντή, η οποία χρησιμοποιεί τους τρεις όρους από τη συνάρτηση απεικόνισης του Marini [9],[10],[11],[23].

Η διαφορά έγκειται στο ότι για την υγρή υστέρηση υπολογίστηκαν και οι τρεις όροι (a_1, a_2, a_3), ενώ για την υδροστατική υστέρηση υπολογίστηκαν μόνο οι δύο πρώτοι όροι και ο όρος a_3 κρατήθηκε σταθερός και ίσος με την τιμή 0.078.

Οι δύο πρώτοι όροι a_1, a_2 υπολογίστηκαν με βάση τις τιμές στην επιφάνεια του εδάφους, όπου:

$$a_i = k_1 + k_2(P - 1000) + k_3(t - 15.0) + k_4 \sqrt{e}, \quad i = 1, 2 \quad (3.14)$$

P = ολική ατμοσφαιρική πίεση (σε mbar).

t = Θερμοκρασία σε βαθμούς Celsius.

e = μερική πίεση των υδρατμών (σε mbar).

Οι συντελεστές k_1, k_2, k_3 και k_4 υπολογίστηκαν ανάλογα με την κλιματική περιοχή του κάθε σταθμού παρατήρησης και σε παγκόσμια κλίμακα.

Μία πιο εξελιγμένη μορφή συνάρτησης προτάθηκε από τον ερευνητή Herring το 1992 [17], ο οποίος ουσιαστικά τροποποίησε τον αριθμητή της σχέσης Marini, καταλήγοντας στη μορφή:

$$m(v) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1+c}}}{\sin(v) + \frac{a}{\sin(v) + \frac{b}{\sin(v)+c}}} \quad (3.15)$$

Και σε αυτή την περίπτωση, οι συντελεστές της συνάρτησης υπολογίζονται από ξεχωριστές σχέσεις σύμφωνα με το γεωγραφικό πλάτος, το ορθομετρικό υψόμετρο και τη θερμοκρασία του εδάφους στο σταθμό παρατήρησης [7]. Η σχέση αυτή απασχόλησε την παρούσα μελέτη και επαναπροσδιορίστηκε κατάλληλα για την εφαρμογή της στον Ελλαδικό χώρο. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο.

Η πιο πρόσφατα γνωστή συνάρτηση απεικόνισης είναι αυτή που προτάθηκε από τον ερευνητή Niell το 1996 [16],[17], η οποία αποτελεί μια βελτιωμένη παραλλαγή της συνάρτησης του Herring, προσθέτοντας έναν διορθωτικό όρο για το υψόμετρο. Πιο συγκεκριμένα, η σχέση αυτή θεωρεί ότι η εξάρτηση του υψομέτρου συνδέεται άμεσα με το γεωγραφικό πλάτος και ύψος (από τη στάθμη της θάλασσας) του σημείου παρατήρησης, καθώς και με την ημέρα του έτους, καταλήγοντας στη μορφή:

$$m(v) = \frac{1 + \frac{a_h}{1 + \frac{b_h}{1+c_h}}}{\sin(v) + \frac{a_h}{\sin(v) + \frac{b_h}{\sin(v)+c_h}}} + \Delta m(v) \quad (3.16)$$

Όπου,

$$\alpha_h(\phi_i, t) = \alpha_{avg}(\phi_i) - \alpha_{amp}(\phi_i) \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right)$$

Με α_{avg} και α_{amp} να δίνονται από πίνακες για γεωγραφικά πλάτη $\phi_i = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 75° , t η ημέρα του έτους (DOY-Day of year) και T_0 είναι τιμή ίση με 28 για το Βόρειο και 211 για το Νότιο ημισφαίριο, αντίστοιχες σχέσεις ισχύουν και για τους συντελεστές b_h, c_h ,

$$\Delta m(v) = \left(\frac{1 + \frac{\alpha_H}{1 + \frac{b_H}{1+c_H}}}{\sin(v) + \frac{\alpha_H}{\sin(v) + \frac{b_H}{\sin(v)+c_H}}} \right) \times H$$

Η το ορθομετρικό υψόμετρο σε Km και

$$\alpha_H = 2.53 \times 10^{-5}, \quad b_H = 5.49 \times 10^{-3}, \quad c_H = 1.14 \times 10^{-3}.$$

Για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη και η προαναφερθείσα σχέση (3.16).

4. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ (GMF- GREEK MAPPING FUNCTION)

4.1 Αρχικά δεδομένα και υπολογισμοί

Η συνάρτηση απεικόνισης που προσδιορίστηκε για τον Ελλαδικό χώρο, που στην παρούσα εργασία για λόγους συντομίας θα καλείται ως GMF, στην ουσία αποτελεί μια τροποποιημένη συνάρτηση της πρότασης Herring για τη συνολική τροποσφαιρική υστέρηση [14]. Ο υπολογισμός των παραμέτρων βασίστηκε σε πραγματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από ραδιοβολίσεις σε 7 σταθμούς (Πίνακας 1) [25].

Οι σταθμοί των ραδιοβολίσεων είναι συνήθως αεροδρόμια που βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους. Κατά τη ραδιοβόλιση, μια συσκευή (ραδιοβολίδα) εφοδιασμένη με βαρόμετρο, θερμομέτρο και υγρόμετρο ανεβαίνει σε συνεχώς μεγαλύτερα ύψη από την επιφάνεια του εδάφους με τη βοήθεια ενός μετεωρολογικού μπαλονιού. Τα μπαλόνια, συνήθως, φτάνουν σε ύψος μέχρι 30Km, τιμή που ανταποκρίνεται σχεδόν στο σύνολο της συνολικής τροποσφαιρικής υστέρησης. Τα όργανα μέτρησης των μετεωρολογικών δεδομένων συνδέονται με έναν πομπό και εκπέμπουν τις μετρήσεις τους σε τακτά χρονικά διαστήματα. Στον σταθμό εδάφους υπάρχει ένας δέκτης και άλλα όργανα όπου λαμβάνουν τα σήματα και τα αποκωδικοποιούν. Οι κωδικοί αριθμοί των σταθμών ραδιοβόλισης που αναφέρονται στον πίνακα 1 είναι σύμφωνα με αυτούς που προκύπτουν από την παγκόσμια αρίθμηση των μετεωρολογικών σταθμών.

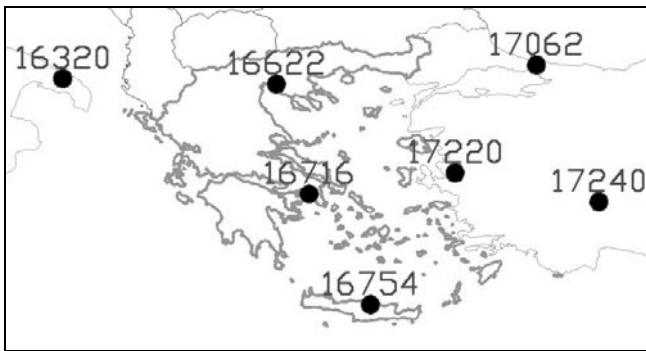
Πίνακας 1. Οι θέσεις και τα ορθομετρικά υψόμετρα των σταθμών ραδιοβόλισης που χρησιμοποιήθηκαν.

Table 1. Locations and orthometric heights of the used radiosonde stations.

Σταθμός(κωδικός)	φ (Dms)	λ (Dms)	H(m)
Σπάρτη Μ. Ασίας (17240)	37°45'00''	30°33'00''	997
Αθήνα (16716)	37°54'00''	23°43'48''	28
Ηράκλειο (16754)	35°19'48''	25°10'48''	37
Θεσσαλονίκη (16622)	40°31'12''	22°58'12''	8
Κωνσταντινούπολη (17062)	40°58'12''	29°04'48''	33
Σμύρνη (17220)	38°25'48''	27°10'12''	25
Πρίντεζι (16320)	40°39'00''	17°57'00''	15

Χρησιμοποιήθηκαν όλοι οι διαθέσιμοι σταθμοί του Ελλαδικού χώρου και τέσσερις περιμετρικοί σταθμοί που βρίσκονται σε Ιταλία και Τουρκία.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι για μια περιορισμένη έκτασης περιοχή, όπως είναι αυτή της Ελλάδας, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το πάχος της τροπόσφαιρας δεν μεταβάλλεται και η συμπεριφορά του τροποσφαιρικού στρώματος μπορεί να περιγραφεί, συναρτήσει μόνο του υψόμετρου του σταθμού και της ημέρας του έτους. Για το λόγο αυτό δεν επιλέχθηκαν περισσότεροι μετεωρολογικοί σταθμοί. Οι όποιες τοπικού χαρακτήρα διαφοροποιήσεις περικλείονται μέσα στην τιμή της συνολικά ζενίθιας υστέρησης. Η κατανομή των σταθμών που επιλέχθηκαν φαίνεται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2. Η κατανομή των σταθμών ραδιοβόλισης που χρησιμοποιήθηκαν στον προσδιορισμό της νέας συνάρτησης απεικόνισης.

Figure 2. The distribution of radiosonde stations used for the new mapping function determination.

Για κάθε σταθμό υπήρχαν διαθέσιμες δύο ραδιοβολίσεις ανά ημέρα και συγκεκριμένα ανά δώδεκα ώρες (12:00 και 00:00 UT), εκτός από τον σταθμό του Πρίντεζι όπου είχαμε τέσσερις ραδιοβολίσεις ανά ημέρα στις ώρες 5:00, 11:00, 17:00 και 23:00 UT. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 10224 ραδιοβολίσεις σε χρονικό διάστημα δύο ετών 2005 και 2006. Στον πίνακα 2 δίνονται οι συνολικοί αριθμοί ραδιοβολίσεων ανά σταθμό για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Πίνακας 2. Αριθμός ραδιοβολίσεων που χρησιμοποιήθηκαν από κάθε σταθμό.

Table 2. Radiosonde observations of each station.

Σταθμός	Αριθμός Ραδιοβολίσεων
Σπάρτη Μ.Ασίας	1407
Αθήνα	1383
Ηράκλειο	1031
Θεσσαλονίκη	1546
Κωνσταντινούπολη	1389
Πρίντεζι	2363
Σμύρνη	1105
Σύνολο	10224

Στο σύνολο των 10224 παρατηρήσεων ραδιοβόλισης υπολογίστηκαν οι βέλτιστα προσαρμοζόμενες παράμετροι των σχέσεων (3.17α-γ) με τη βοήθεια των οποίων προκύπτουν οι συντελεστές a, b και c της συνάρτησης απεικόνισης GMF για την αντίστοιχη ημέρα παρατήρησης και σύμφωνα με το υψόμετρο του σημείου μέτρησης.

$$a = a_0 + a_H \cdot H + a_L \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right) \quad (3.17\alpha)$$

$$b = b_0 + b_H \cdot H + b_L \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right) \quad (3.17\beta)$$

$$c = c_0 + c_H \cdot H + c_L \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right) \quad (3.17\gamma)$$

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι κατά τον υπολογισμό των βέλτιστων εξισώσεων για τις παραμέτρους b και c αγνοήθηκε ο χρονικός όρος αφού, όπως παρατηρήθηκε, ο χρονικός συντελεστής και για τις δύο παραμέτρους τείνει στο μηδέν και συνεπώς μπορεί να αγνοηθεί, δηλαδή προέκυψε ότι,

$$b_L \cong 0 \Rightarrow b_L \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right) \cong 0$$

Ομοιες σχέσεις ισχύουν και στην περίπτωση του συντελεστή c. Οι τελικές σχέσεις για τον υπολογισμό των παραμέτρων b και c είναι πλέον οι εξής:

$$B = b_0 + b_H \cdot H \quad \text{και} \quad C = c_0 + c_H \cdot H$$

Ο υπολογισμός των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων κάθε σχέσης έγινε μέσω της συνόρθωσης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων με τη βοήθεια λογισμικού που αναπτύχθηκε για αυτό τον σκοπό. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο των εξισώσεων παρατηρήσεων, ο πίνακας σχεδιασμού για τη σχέση (3.17α) θα έχει την αναλυτική δομή:

$$A = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial a_1}{\partial a_0} \right|_0 & \left. \frac{\partial a_1}{\partial a_H} \right|_0 & \left. \frac{\partial a_1}{\partial a_L} \right|_0 & \left. \frac{\partial a_1}{\partial T_0} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \left. \frac{\partial a_n}{\partial a_0} \right|_0 & \left. \frac{\partial a_n}{\partial a_H} \right|_0 & \left. \frac{\partial a_n}{\partial a_L} \right|_0 & \left. \frac{\partial a_n}{\partial T_0} \right|_0 \end{bmatrix}$$

Όπου,

$$\frac{\partial a}{\partial a_0} = 1, \quad \frac{\partial a}{\partial a_H} = H,$$

$$\frac{\partial a}{\partial a_L} = \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right)$$

και

$$\frac{\partial a}{\partial T_0} = \frac{2\pi}{365.25} \cdot a_L \cdot \sin\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right)$$

με H το ορθομετρικό υψόμετρο του σημείου σε m και t την ημέρα του έτους.

Αντίστοιχα, η δομή του πίνακα των ανηγμένων παρατηρήσεων θα είναι:

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} a_1^b - a_1^0 \\ a_2^b - a_2^0 \\ \vdots \\ a_n^b - a_n^0 \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας βάρους θεωρήθηκε ίσος με τον μοναδιαίο δηλαδή, $\mathbf{P}=\mathbf{I}$.

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο της συνόρθωσης, οι βέλτιστες εκτιμήσεις των αγνώστων συντελεστών δίνονται από τις σχέσεις,

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{b} \quad \text{και} \quad \hat{x}^a = \mathbf{x}^0 + \hat{\mathbf{x}}$$

Οι εκτιμήσεις που προέκυψαν μαζί με τις μεταβλητότητές τους δίνονται στον πίνακα 3.

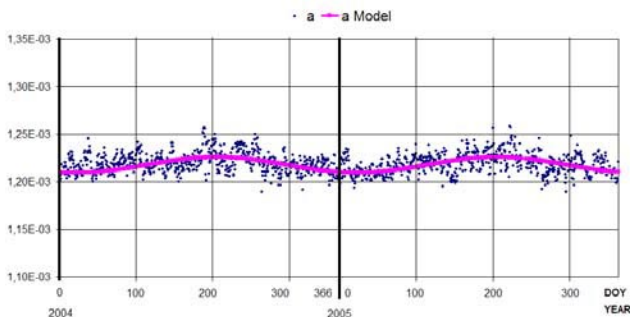
Πίνακας 3. Εκτιμήσεις συντελεστών για τον υπολογισμό της παραμέτρου a της GMF συνάρτησης απεικόνισης.

Table 3. Estimation of coefficients for the calculation of the parameter a of Greek mapping function.

Συντελεστής	Τιμή	$\hat{\sigma}^2$
a_0	$1.218184160 \cdot 10^{-03}$	$2.5849 \cdot 10^{-14}$
a_H	$-1.573952267 \cdot 10^{-08}$	$3.5689 \cdot 10^{-14}$
a_L	$-8.215918656 \cdot 10^{-06}$	$5.9399 \cdot 10^{-20}$
T_0	23	1.8

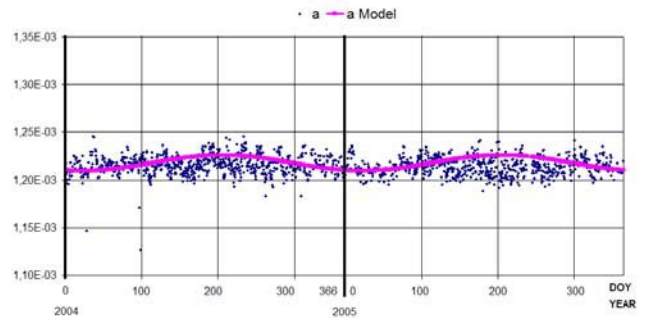
Στα σχήματα 3 και 4 φαίνεται η προσαρμογή των βέλτιστων γραμμών υπολογισμού της παραμέτρου a που προκύπτουν από την εφαρμογή των εκτιμήσιμων συντελεστών, στις τιμές της ραδιοβόλισης, για τους σταθμούς της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, αντίστοιχα.

Η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε και για τον υπολογισμό των υπολοίπων παραμέτρων ώστε να προκύψουν ξανά οι βέλτιστα προσαρμοζόμενες γραμμές για τους συντελεστές b και c , κάνοντας, επίσης, χρήση του μοντέλου των εξισώσεων παρατηρήσεων. Ο πίνακας σχεδιασμού \mathbf{A} σε αυτή την περίπτωση και για τις δύο σχέσεις (3.17β και 3.17γ) έχει την ίδια δομή:



Σχήμα 3. Προσαρμογή γραμμής για τον υπολογισμό της παραμέτρου a στον σταθμό της Αθήνας.

Figure 3. Fitting line for computation of the parameter a for Athens radiosonde station.



Σχήμα 4. Προσαρμογή γραμμής για τον υπολογισμό της παραμέτρου a στον σταθμό της Θεσσαλονίκης.

Figure 4. Fitting line for computation of the parameter a for Thessaloniki radiosonde station.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & H_1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & H_n \end{bmatrix}$$

οι πίνακες \mathbf{x}^0 και \mathbf{b} για τη σχέση (3.17β) έτσι όπως κατέληξε θα είναι οι:

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1^b - b_1^0 \\ b_2^b - b_2^0 \\ \vdots \\ b_n^b - b_n^0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}^0 = \begin{bmatrix} b_0^0 \\ b_H^0 \end{bmatrix}$$

και αντίστοιχα για την (3.17γ) οι:

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} c_1^b - c_1^0 \\ c_2^b - c_2^0 \\ \vdots \\ c_n^b - c_n^0 \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \mathbf{x}^0 = \begin{bmatrix} c_0^0 \\ c_H^0 \end{bmatrix}$$

Οι βέλτιστες εκτιμήσεις των αγνώστων συντελεστών της σχέσης 3.17β μαζί με τις μεταβλητότητες τους δίνονται στους πίνακες 4 και 5.

Πίνακας 4. Εκτιμήσεις συντελεστών για τον υπολογισμό της παραμέτρου b της GMF συνάρτησης απεικόνισης.

Table 4. Estimation of coefficients for the calculation of the parameter b of Greek mapping function.

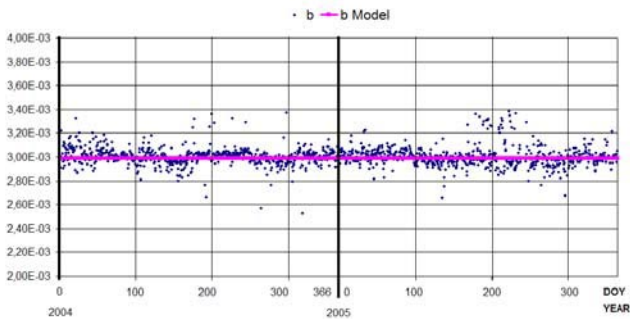
Συντελεστής	Τιμή	$\hat{\sigma}^2$
b_0	$3.001185483 \cdot 10^{-03}$	$1.483914777 \cdot 10^{-12}$
b_H	$-2.869784419 \cdot 10^{-08}$	$3.421381050 \cdot 10^{-18}$

Πίνακας 5. Εκτιμήσεις συντελεστών για τον υπολογισμό της παραμέτρου c της GMF συνάρτησης απεικόνισης.

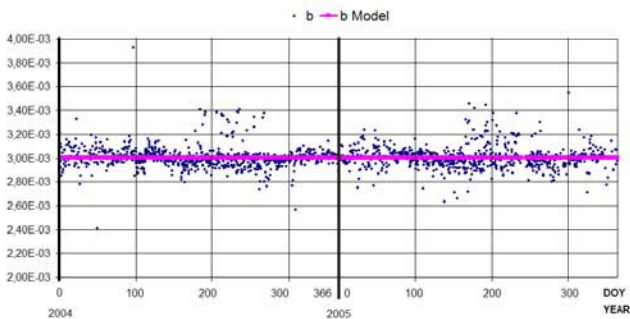
Table 5. Estimation of coefficients for the calculation of the parameter c of Greek mapping function.

Συντελεστής	Τιμή	$\hat{\sigma}^2$
c_0	$6.658541231 \cdot 10^{-02}$	$1.379873634 \cdot 10^{-09}$
c_H	$-2.265285776 \cdot 10^{-08}$	$3.1814990834 \cdot 10^{-15}$

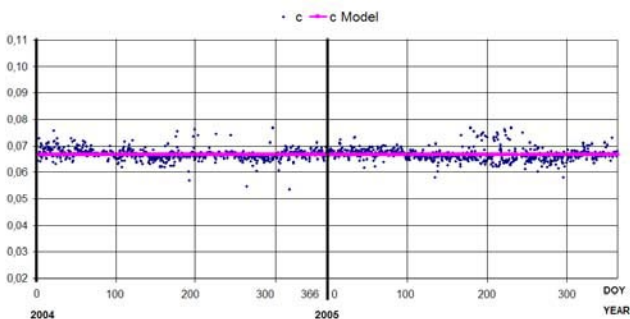
Στα διαγράμματα 5 και 6 απεικονίζεται η προσαρμογή των βέλτιστων γραμμών υπολογισμού της παραμέτρου b για τους σταθμούς της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, ενώ αντίστοιχα στα σχήματα 7 και 8 απεικονίζονται οι βέλτιστες γραμμές σχετικά με την παράμετρο c .



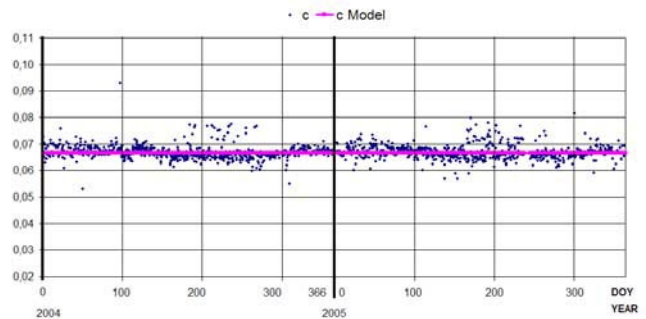
Σχήμα 5. Προσαρμογή γραμμής για τον υπολογισμό της παραμέτρου b στον σταθμό της Αθήνας.
Figure 5. Fitting line for computation of the parameter b for Athens radiosonde station.



Σχήμα 6. Προσαρμογή γραμμής για τον υπολογισμό της παραμέτρου b στον σταθμό της Θεσσαλονίκης.
Figure 6. Fitting line for computation of the parameter b for Thessaloniki radiosonde station.



Σχήμα 7. Προσαρμογή γραμμής για τον υπολογισμό της παραμέτρου c στον σταθμό της Αθήνας.
Figure 7. Fitting line for computation of the parameter c for Athens radiosonde station.



Σχήμα 8. Προσαρμογή γραμμής για τον υπολογισμό της παραμέτρου c στον σταθμό της Θεσσαλονίκης.
Figure 8. Fitting line for computation of the parameter c for Thessaloniki radiosonde station.

4.2 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Με σκοπό τον έλεγχο της αξιοπιστίας της νέας συνάρτησης απεικόνισης μελετήθηκε η συμπεριφορά της τόσο σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν από τις ραδιοβολίσεις, όσο και σε σχέση με τις τιμές που δίνουν οι γνωστές συναρτήσεις απεικόνισης που προτείνονται από τη διεθνή βιβλιογραφία. Αρχικά, προσδιορίστηκαν οι αντίστοιχες τροποσφαιρικές υστερήσεις από τις μετρήσεις ραδιοβολίσης για τους σταθμούς της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις απεικόνισης των Υφαντή και Niell που περιγράφηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Θεωρείται σκόπιμο να αναφερθεί ότι και οι δύο τύποι συνάρτησης θεωρούνται διεθνώς από τις ακριβέστερες για τον υπολογισμό της τροποσφαιρικής επίδρασης ακόμη και για μικρές γωνίες ύψους των δορυφόρων εκπομπής. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι δύο ραδιοβολίσεις ανά ημέρα, αλλά μόνο για το έτος 2005 και ο υπολογισμός της υστέρησης έγινε για γωνίες ύψους $3^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ και 30° . Επίσης, για τις ίδιες γωνίες ύψους υπολογίστηκε η τροποσφαιρική υστέρηση και από τις τρεις πλέον συναρτήσεις απεικόνισης (Niell, Υφαντή, GMF). Ακολούθησε ο υπολογισμός των διαφορών μεταξύ των τιμών που έδωσε η κάθε συνάρτηση απεικόνισης με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από τις τιμές των ραδιοβολίσεων. Οι διαφορές που προκύπτουν από τη σύγκριση αυτή μπορούν να θεωρηθούν ως ένα μέτρο αξιοπιστίας. Για την επεξεργασία των δεδομένων της ραδιοβολίσης χρησιμοποιήθηκε η τεχνική του διπλού εκθετικού μετασχηματισμού, η οποία υλοποιήθηκε με τη βοήθεια αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν για αυτό το σκοπό [12],[15]. Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι για γωνίες ύψους μεγαλύτερες των 30° οι διαφορές που προέκυψαν μεταξύ των τιμών της GMF και της ραδιοβολίσης ήταν πολύ μικρότερες του χιλιοστού οπότε δεν κρίθηκε αναγκαία η προβολή των αποτελεσμάτων.

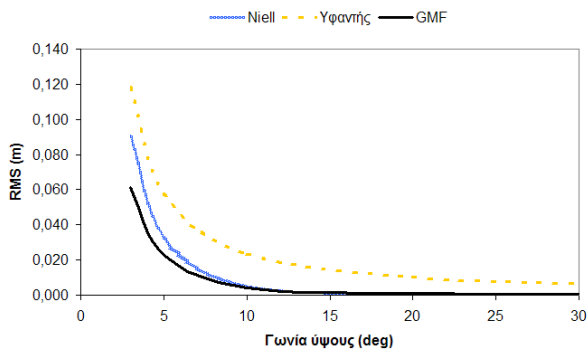
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά των συγκρίσεων που εφαρμόστηκαν. Στον

πίνακα 6 δίνεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των διαφορών μεταξύ της κάθε συνάρτησης και ραδιοβόλισης για ένα δείγμα 725 παρατηρήσεων από το σταθμό της Θεσσαλονίκης. Επίσης, στο σχήμα 9 φαίνεται η μεταβολή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (των διαφορών) της κάθε συνάρτησης απεικόνισης, συναρτήσει της γωνίας ύψους.

Πίνακας 6. Μέσο τετραγωνικό σφάλμα των διαφορών μεταξύ των τιμών των τριών συναρτήσεων απεικόνισης και ραδιοβόλισης στον σταθμό της Θεσσαλονίκης σε m.

Table 6. Rms error of differences between the three mapping functions and radiosonde values for Thessaloniki station in m.

Γωνία ύψους	Συνάρτηση Niell	Συνάρτηση Υφαντή	GMF
3°	0.089976	0.117746	0.061279
5°	0.032495	0.057012	0.022445
10°	0.005337	0.023437	0.003865
20°	0.000927	0.010037	0.000852
30°	0.000485	0.006442	0.000488



Σχήμα 9. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των διαφορών της κάθε συνάρτησης απεικόνισης από τη ραδιοβόλιση, συναρτήσει της γωνίας ύψους για τον σταθμό της Θεσσαλονίκης σε m.

Figure 9. RMS error of computed differences between tested mapping functions and the radiosonde according to elevation angle for Thessaloniki station in m.

Στους πίνακες 7 και 8 δίνονται η ελάχιστη και μέγιστη τιμή των διαφορών της κάθε συνάρτησης απεικόνισης για τον σταθμό ραδιοβόλισης στη Θεσσαλονίκη.

Πίνακας 7. Ελάχιστες τιμές διαφορών μεταξύ των τριών συναρτήσεων απεικόνισης και της ραδιοβόλισης στον σταθμό της Θεσσαλονίκης σε m.

Table 7. Minimum difference values between the three mapping functions and radiosonde for Thessaloniki station in m.

Γωνία ύψους	Συνάρτηση Niell	Συνάρτηση Υφαντή	GMF
3°	-0.22640	-0.06010	-0.15880
5°	-0.07420	-0.00500	-0.05900
10°	-0.01150	0.01280	-0.00900
20°	-0.00240	0.00730	-0.00190
30°	-0.00140	0.00500	-0.00110

Πίνακας 8. Μέγιστες τιμές διαφορών μεταξύ των τριών συναρτήσεων απεικόνισης και της ραδιοβόλισης στον σταθμό της Θεσσαλονίκης σε m.

Table 8. Maximum difference values between the three mapping functions and the radiosonde for Thessaloniki station in m.

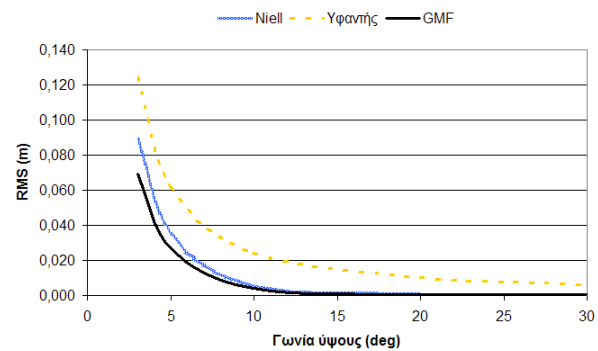
Γωνία ύψους	Συνάρτηση Niell	Συνάρτηση Υφαντή	GMF
3°	0.20220	0.29460	0.20660
5°	0.07650	0.11440	0.06930
10°	0.01430	0.03340	0.01280
20°	0.00290	0.01240	0.00310
30°	0.00160	0.00800	0.00170

Στον πίνακα 9 δίνεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των διαφορών μεταξύ της κάθε συνάρτησης απεικόνισης και της ραδιοβόλισης από τον σταθμό της Αθήνας για ένα δείγμα 734 παρατηρήσεων. Επίσης, στο σχήμα 10 φαίνεται η μεταβολή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, συναρτήσει της γωνίας ύψους.

Πίνακας 9. Μέσο τετραγωνικό σφάλμα των διαφορών μεταξύ τιμών των τριών συναρτήσεων απεικόνισης και της ραδιοβόλισης στον σταθμό της Αθήνας σε m.

Table 9. RMS error of differences between the three mapping functions and the radiosonde values for Athens station in m.

Γωνία ύψους	Συνάρτηση Niell	Συνάρτηση Υφαντή	GMF
3°	0.08881	0.12380	0.06914
5°	0.03495	0.06093	0.02663
10°	0.00578	0.02469	0.00421
20°	0.00097	0.01008	0.00076
30°	0.00046	0.00639	0.00043



Σχήμα 10. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των διαφορών της κάθε συνάρτησης απεικόνισης από τη ραδιοβόλιση, συναρτήσει της γωνίας ύψους για τον σταθμό της Αθήνας σε m.

Figure 10. RMS error of computed differences between the tested mapping functions and the radiosonde according to elevation angle for Athens station in m.

Στους πίνακες 10 και 11 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές για το ελάχιστο και μέγιστο σφάλμα (διαφορά) για τον σταθμό της Αθήνας.

Πίνακας 10. *Ελάχιστες τιμές διαφορών μεταξύ των τριών συναρτήσεων απεικόνισης και της ραδιοβόλισης στον σταθμό της Αθήνας σε m.*

Table 10. *Minimum difference values between the three mapping functions and radiosonde for Athens station in m.*

Γωνία ύψους	Συνάρτηση Niell	Συνάρτηση Υφαντή	GMF
3°	-0.22620	-0.03340	-0.24620
5°	-0.07480	0.00470	-0.08880
10°	-0.01130	0.01450	-0.01370
20°	-0.00270	0.00740	-0.00290
30°	-0.00200	0.00440	-0.00210

Πίνακας 11. *Μέγιστες τιμές διαφορών μεταξύ των τριών συναρτήσεων απεικόνισης και της ραδιοβόλισης στον σταθμό της Αθήνας σε m.*

Table 11. *Maximum difference values between the three mapping functions and the radiosonde for Athens station in m.*

Γωνία ύψους	Συνάρτηση Niell	Συνάρτηση Υφαντή	GMF
3°	0.24520	0.25420	0.12550
5°	0.09270	0.10450	0.04910
10°	0.01630	0.03190	0.01000
20°	0.00320	0.01220	0.00290
30°	0.00140	0.00760	0.00130

Σύμφωνα με τα στατιστικά αποτελέσματα που περιγράφηκαν, την καλύτερη συμβατότητα στον υπολογισμό της τροποσφαιρικής υστέρησης έχει η νεοπροσδιοριζόμενη συνάρτηση GMF, ενώ για γωνίες ύψους μεγαλύτερες των 10°, οι τιμές που έδωσε ήταν σχεδόν όμοιες με τις αντίστοιχα υπολογιζόμενες από τη συνάρτηση απεικόνισης Niell.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν, γίνεται φανερό ότι το νέο μοντέλο συνάρτησης απεικόνισης παρουσιάζει καλύτερη προσαρμογή στα πραγματικά δεδομένα που προκύπτουν από τις ραδιοβολίσεις και κατά συνέπεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αναγωγές μετρήσεων ακριβείας με καλύτερα αποτελέσματα στην περιοχή του Ελλαδικού χώρου. Επιπλέον, η χρήση της συνάρτησης δεν απαιτεί επιφανειακά μετεωρολογικά δεδομένα, αφού ορίζεται μόνο με βάση την ημέρα του έτους και το υψόμετρο του σταθμού, κάτι το οποίο απαιτεί χρόνο ούτε και την ύπαρξη ακριβούς εξοπλισμού. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι η ταχύτητα των υπολογισμών της προτεινόμενης συνάρτησης σε σχέση με τις άλλες συναρτήσεις με τις οποίες έγιναν συγκρίσεις είναι μεγαλύτερη λόγω της απλοποιημένης μορφής της. Η παρούσα συνάρτηση έδειξε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε γωνίες ύψους των δορυφόρων χαμηλότερες από 15°, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τον αριθμό των προς επεξεργασία δεδομένων. Σε επιπλέον συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε ότι η συγκεκριμένη συνάρτηση απεικόνισης δεν δίνει

καλύτερα αποτελέσματα από τις αντίστοιχες των Υφαντή και Niell για σταθμούς εκτός του Ελληνικού χώρου κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο, αφού θεωρήθηκε ότι το πάχος της τροπόσφαιρας δεν μεταβάλλεται. Η χρήση της προτείνεται μόνο για το εύρος της περιοχής του Ελλαδικού χώρου που περιλαμβάνεται στον πίνακα 12. Ο προσδιορισμός μίας νέας συνάρτησης απεικόνισης που να καλύπτει τον Ευρωπαϊκό χώρο βασιζόμενη σε περισσότερους σταθμούς ραδιοβόλισης θα μπορούσε να αποτελέσει ένα από τα επόμενα στάδια της παρούσας έρευνας.

Πίνακας 12. *Όρια γεωγραφικού πλάτους και μήκους για την εφαρμογή της νέας συνάρτησης απεικόνισης.*

Table 12. *Geographical latitude and longitude limits for using the Greek Mapping Function.*

	φ (Dms)	λ (Dms)
Max	41°40'	27°00'
Min	34°40'	19°40'

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Askne J., Nordius H., Anderson E., Elgered G. and Ronnang B.: **Satellite – Earth Range Measurements, part II: Modeling the Troposphere Delay**, ESTEC Contract No. 5910/84/NL/MD Report. Research Report, Onsala Space Observatory, Chalmers University of Technology, Sweden, 1986.
- Askne J. and Nordius H.: Estimation of Tropospheric delay for microwaves from surface weather data", **Radio Science**, **28**, Num. 3, pp 379-386, 1987.
- Chao, C. C.: **A Model for Tropospheric Calibration from Daily Surface and Radiosonde Balloon Measurements**, Tech. Memorandum 391-350, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 1972.
- Chao, C. C.: **A new method to predict wet zenith range refraction from surface measurements of meteorological parameters**, in DSN Progress Report, No. 32-1526, Vol. XIV, pp. 33-41, Jet Prop. Lab., Pasadena, California, 15 April 1973, 1973.
- Davis, J. L., T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. E. Rogers, and G. Elgered.: Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length, **Radio Science**, **20**, 1985
- Δερμάνης Α.: **Διαστημική Γεωδαισία και Γεωδυναμική GPS**, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1999.
- Herring, T. A.: Modelling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data", in **Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy**, edited by J. C.DeMunkand T. A. Spoelstra, Netherlands Geodetic Commission Series No. 36, pp. 157-164, 1992a.
- Hopfield, H. S.: Two Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data, **Journal of Geophysical Research**, vol. **74**, No 18, pp. 4487-4499, 1969.
- Ifadis I. M.: **The atmospheric delay of radio waves: modeling the elevation dependence on a global scale**, Technical Report No. 38L, School of Electrical and Computer Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1986.
- Ifadis I. M.: A new approach to mapping the atmospheric effect for GPS observations, **Earth Planets Space**, **52**, pp.703-708, 2000.
- Ifadis I. M.: Mapping the horizontal gradients on a four station network, IAIN World Congress in Association with the U.S. **ION Annual Meeting**, June 26-28, 2000, Catamaran Hotel, San Diego, CA, 2000a.
- Katsougiannopoulos S., Pikridas C., Rossikopoulos D., Ifadis I.M. and Fotiou A.: Tropospheric refraction estimation using various models,

- radiosonde measurements and permanent GPS data. **Proceedings of FIG XIII international congress**, 8-13 October, Munich Germany, 2006.
13. Marini, J. W.: **Correction of Radio Range Tracking Data for Atmospheric Refraction at Elevation above 10 Degrees**, Internal NASA Memorandum, 1974.
 14. Mendes V. B., Prates G., Pavlis E.C., Pavlis D.E., and Langley R.B.: Improved mapping functions for atmospheric refraction correction in SLR. **Geophysical Research Letters**, Vol. 29, No. 10, 1414, doi: 10.1029/2001GL014394, 2002.
 15. Nakamura, S.: **Applied Numerical Methods with Software**, Prentice-Hall Inc. 1991
 16. Niell, A. E., Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, **Journal Geophysical Research**, vol. 100, pp.3227–3246, 1996.
 17. Niell, A. E.: Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS, **Earth Planets Space**, 52, pp.699–702, 2000.
 18. Seeber, G., **Satellite Geodesy: Foundations, methods and applications**, Walter de Gruyter, 1993.
 19. Smith, W. L.: Note on the Relationship Between Total Precipitable Water and Surface Dew Point, **Journal of Applied Meteorology**, vol. 5, pp. 726-767 , 1966.
 20. Saastamoinen, J.: Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, in The Use of Artificial Satellites for Geodesy, **Geophys. Monogr. Ser.**, vol. 15, edited by S. W. Henriksen, A. Mancini, and B.H. Chovitz, pp. 247-251, AGU, Washington, D.C., 1972.
 21. Thayer, G. D.: An Improved equation for the Radio Refractive Index of Air, **Radio Science**, vol. 9, pp 803-807, 1974.
 22. Wells, D. E., W. Beck, D. Delikaraoglou, A. Kleusberg, E. J. Krakiwsky, G. Laschappele, R. B. Langley, M. Nakiboglou, K. P. Swartz, J. M. Tranquila and P. Vanicek, **Guide to GPS Positioning**, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1986.
 23. Υφαντής Ι. Μ., **Συμβολή στη μελέτη της επίδρασης της ατμοσφαιρικής διάθλασης κατά την χρήση ραδιοκυμάτων στις σύγχρονες γεωδαιτικές μεθόδους μετρήσεων μεγάλων αποστάσεων**. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 1987.
 24. Φωτίου Α., Χ. Πικριδάς.: **GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές**. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2006.
 25. BADC: The British Atmospheric Data Centre, <http://badc.nerc.ac.uk>.

Σ. Κατσουγιαννόπουλος

Υποψήφιος διδάκτωρ, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, ΑΠΘ, 541 24 Θεσσαλονίκη, ΤΘΠ 473.

Χ. Πικριδάς

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, ΑΠΘ, 541 24 Θεσσαλονίκη, ΤΘΠ 432.

Extended summary

Mapping function determination for computing the tropospheric delay in GPS signals using radiosonde data. Application to the Hellenic region

S. KATSOUGIANNOPOULOS

PhD, Candidate, A.U.TH

CH. PIKRIDAS

Assistant Professor, A.U.TH

Abstract

The main goal of the present paper is the determination of a new mapping function in order to better handle the tropospheric effect on GPS signals, especially for the Hellenic region. In space-to-earth geodetic techniques the troposphere affects the radio wave propagation. In order to estimate the total non-zenith path delay various mapping functions have been proposed to scale the zenith delay to other elevations. The computational method is based on radiosonde balloon measurements selected from seven stations inside and around Greece covering a two-year time span. The effectiveness of the new function is tested against Niell and Ifadis mapping functions. A comparison of the results is presented and finally some useful conclusions are drawn.

1. INTRODUCTION

GPS signals are refracted by the lower part of the earth's atmosphere, up to 80Km altitude, composed of dry gases and water vapor. The overall effect of the neutral atmosphere is referred to as the tropospheric effect. The neutral atmosphere is a nondispersive medium with respect to radio waves up to frequencies of 15 GHz and its delay is a function of atmospheric pressure, temperature and moisture content. For directions not too far from zenith the tropospheric delay may be approximated by the zenith delay, calculated by standard models, multiplied by the cosecant of the elevation angle. This is the simplest form of a mapping function. For the past twenty years several investigators have proposed functions to scale the zenith hydrostatic delay to a lower elevation angle.

The functions of Niell and Ifadis were used in this study. In this paper, two years of radiosonde data for seven stations were downloaded from the British Atmospheric Data Center and properly analyzed in order to determine the Greek mapping function.

This new function has shown better behavior when computing the tropospheric delay, even for satellite elevation angles lower than 15°. The derived results were compared to the relevant values calculated by the Niell and Ifadis mapping functions and also with radiosonde measurements.

2. TROPOSPHERIC REFRACTION AND MAPPING FUNCTIONS

2.1 Tropospheric refraction

The neutral atmosphere is the lowest part of the earth's atmosphere, up to about 80 km altitude. The neutral atmosphere consists of a combination of several gases. The signal propagation within this layer depends on temperature, pressure and water vapor. The factor that describes the variability of neutral atmosphere is the refractive index (n), which strongly depends on space and time. Because the refractive index takes very small values, it is not used in the calculations and is replaced by the refractivity N ($N=10^6(n-1)$). The variability of the air refractivity with space and time affects the way that a radiowave propagates through the atmosphere. The radiowave bends and its speed is delayed. The final result is the so called total atmospheric delay. The path delay is finally given by equation 3.8

2.2 Mapping functions

For high precision geodetic applications, especially at a lower elevation angle, the delay should be connected with the elevation angle. The connection between the delay and the elevation angle is expressed by a function called a

mapping function. The tropospheric delay is mapped with the mapping function for each ray trace in a total delay from zenith. In 1972 Marini proposed a mapping function in a continuously fractional form given in equation 3.12. Several mapping functions have been developed based on this fraction form. The best known are those calculated by Davis, Ifadis, Herring and Niell. All of the above models share the basic form of the continuous fraction, which is used for the geometrical approximation of the elevation dependence of the delay.

3. THE NEW MAPPING FUNCTION DETERMINATION

The computational process for the determination of the new mapping function parameters is based on radiosonde measurements. In this study, two years of radiosonde data were downloaded from the British Atmospheric Data Center. The weather balloons were launched at seven different geographic locations, ranging from Bridezi in Italy to Isparta in Turkey. Typically, balloons were launched twice per day throughout the study period, except for the Bridezi station (4

times within each day). The total number of measurements was equal to 10224.

By analyzing this mass of data, using double exponential transformation algorithms, the critical factors of the new model were estimated by the best fitting lines in a least-squares sense.

4. CONCLUSIONS

A new mapping function for computing the tropospheric delay at various satellite elevation angles was determined. The computational process was based on radiosonde balloon measurements selected from seven stations in and around Greece covering a two-year time span. For comparison reasons the tropospheric delay was calculated at the seven stations using the known formulae of Ifadis and Niell. All the tests were applied for two stations located at geographic locations inside the Hellenic region. From the analysis of the results it has been clearly shown that the new mapping function has better behavior when computing the tropospheric delay, even for satellite elevation angles lower than 15° , such as 3° , 5° , and 10° .

S. Katsougiannopoulos

Ph.D. Candidate, School of Rural and Surveying Engineering, Department of Geodesy and Surveying, Aristotle University, 541 24 Thessaloniki.

Ch. Pikridas

Assistant Professor, School of Rural and Surveying Engineering, Department of Geodesy and Surveying, Aristotle University, 541 24 Thessaloniki.